# 物理学実験 I：宇宙線[†]

2014 年度版 実験室：理学部 A001

担当教員**身内賢太朗**
（自然科学研究棟 3 号館東 3 階 317 号室、内線 5637、miuchi@phys.sci.kobe-u.ac.jp）
TA **矢ケ部遼太**

1980.0. 藤井忠男・中村健蔵
1991.10. 武田 廣（改訂）
2001.11. 川越清以 (改訂)
その後、毎年すこしずつ更新。(越智 敦彦・川越 清以)
2010.10 竹内康雄
2014.10 身内賢太朗

## 目 次

**1 イントロダクション** **2**
1.1 実験目的 . . . . . 2
1.2 学習の順序 . . . . . 2
1.3 参考文献 . . . . . 3

**2 実験手順** **3**
2.1 オシロスコープの準備 . . . . . 4
2.2 高電圧の配線 . . . . . 4
2.3 高電圧の設定 (1) . . . . . 5
2.4 高電圧の設定 (2) . . . . . 5
2.5 遅延時間の設定 . . . . . 6
2.6 宇宙線中の荷電粒子のフラックスの測定 . . . . . 7
2.7 データ解析のための補足 . . . . . 9
2.7.1 統計誤差 . . . . . 9
2.7.2 最小２乗法 . . . . . 9

**3 実験装置について** **11**
3.1 素粒子実験の同時計数 . . . . . 11
3.1.1 シンチレーションカウンター . . . . . 12
3.1.2 ディスクリミネーター回路 . . . . . 12
3.1.3 コインシデンス回路 . . . . . 14
3.1.4 可変遅延線 . . . . . 14
3.1.5 計数回路（スケーラー） . . . . . 17
3.1.6 実際の素粒子実験での使用例 . . . . . 17

[†]このテキストに誤りや改善すべき部分があれば、担当教員まで連絡してください。

3.1.7 宇宙線のコインシデンス計数 . . . . . 19
3.1.8 荷電粒子の電離損失 . . . . . 19
3.1.9 同時計数の実際 . . . . . 20
3.2 伝送線（同軸ケーブル) . . . . . 23
3.2.1 同軸ケーブルと特性インピーダンス . . . . . 23
3.2.2 同軸ケーブルのパルスに対する反応 . . . . . 24
3.2.3 インピーダンスマッチングをとる方法 . . . . . 27

# 1 イントロダクション

## 1.1 実験目的

1. プラスチックシンチレーションカウンターを使って宇宙線中の荷電粒子のフラックス（流束密度）を測定する。

2. この測定を通じて、素粒子実験に用いられる以下の基本的な実験装置の使用法・基本特性を習得する。

   - オシロスコープ
   - 伝送線（同軸ケーブル）
   - 高電圧電源
   - 光電子増倍管（PMT）
   - 波高弁別回路（ディスクリミネーター回路）
   - 同時計数回路（コインシデンス回路）
   - 計数回路（スケーラー回路）

## 1.2 学習の順序

1. 前もってこのテキストをよく読んで、この実験で取り扱うオシロスコープ、同軸ケーブル、シンチレーションカウンター、光電子増倍管、基本的な回路などについて理解しておくこと。第 3 章の「実験装置について」も必ず読んでおくこと。

2. 1 日目・2 日目に実験を行う。1 日目は実験装置の使用方法を習得しながら実験の手順の 2.1–2.5 を行う。2 日目に 2.6 の宇宙線中の荷電粒子のフラックスの測定を行う。

3. 3 日目・4 日目はデータ解析・レポート作成にあてる。以下はレポートに関する注意事項。

   - レポートには以下の内容を含めること。（パソコン等を使用しても構いません。）
     - 目的、装置の説明を簡潔に。
     - 実際に行ったセットアップ、操作手順、得られたデータ（数値、テーブル、グラフ等)、解析で用いた計算式、課題ごとの考察。

  - 参考文献、感想。
- 締め切りは厳守すること。締め切りに遅れたレポートは減点の対象とする。最終締め切り以後はレポートを受け取らない。

4. 以下は全体を通しての注意事項。

- レポートを書く際に困らないように、記録はしっかり残す。セットアップの配線図、どのような操作を行ってどのようなデータが得られたか、各種測定環境・条件の記録、操作を行った時刻、等。
- ログノートには間違って行った実験内容等に関しても記録を残しておく。ログノートに消しゴムは使用しない。その時は不要だと思っても、後で必要となる内容があるかもしれない。清書はレポート書くときに行えばよい。
- データをとりながらプロットなどを作成し、予想通りかどうか確認しながら進める。おかしいデータの時には早い時期に気づくことが可能で、再測定が可能になる。
- 架台のねじをゆるめすぎないように注意する。ねじが完全に外れてしまうと再取り付けに手間がかかるため。

### 1.3 参考文献

- 粒子線検出器、K. Kleinknecht 著、培風館
- 放射線計測、加藤貞幸著、培風館
- 宇宙素粒子物理学、C. グルーペン著、シュプリンガー・ジャパン
- 宇宙線、小田稔著、裳華房

## 2 実験手順

プラスチックシンチレーチョンカウンターを用いて宇宙線中の荷電粒子の フラックス（束密度）を測定する。この測定に使用する装置について第 3 章に解説があるので、よく読んでから使用すること。

**!! 高電圧に注意しよう。命は一つしかないよ。 !!**

高電圧ケーブルを結線したりはずしたりする必要がある時は、必ず高電圧電源の主電源をオフにして行うこと。

## 2.1 オシロスコープの準備

本実験ではデジタルオシロスコープを用いる。アナログオシロスコープが机上にある場合、電源を抜いて机の下に移動しておくこと。

デジタルオシロスコープの電源を入れて、各設定を以下のようにする。

1. ch1、ch2 どちらも入力を「DC、50 オーム、プローブ ×1」に設定する。
2. トリガを下向きエッジでかかるようにする。
3. トリガソースは ch1
4. delay の LED がついていたら消す。
5. それでもおかしかったら、autoset を押してから再設定をする

## 2.2 高電圧の配線

高電圧電源を用いて光電子増倍管へ高電圧をかける為の配線を行う。この実験では 4 チャンネル高電圧電源を使う (RPH-030)。この高電圧電源は各チャンネル毎に異なる電圧を設定することができる。背面の高電圧コネクタから各光電子増倍管の高電圧コネクタに高電圧ケーブルを通じて高電圧が供給される。通常、高電圧ケーブルは既に配線されているので、配線を確認するだけで良い。実験終了後も、高電圧ケーブルをはずす必要はない。なお、この実験で使う高電圧用のコネクタは SHV と呼ばれる種類です。

高電圧電源は次のようにして使う。詳細は取扱説明書を参照すること。

1. NIM ビンの電源を入れる。
2. 各チャンネルの電圧調整つまみが最小になっていることを確認。
3. 主電源スイッチをオンにする。
4. 各チャンネルの電源スイッチをオンにする。
5. 各チャンネルの電圧調整つまみを回し、パネルに表示される値を見ながら各チャンネル毎に電圧を設定する。
6. 電源を切るときはこれまでの逆の操作を行う。

まず電圧を −1350 V 程度に設定し、シンチレーションカウンターの信号出力端子を 2 m の同軸ケーブル (LEMO ケーブルと呼ばれるケーブルを使います) を用いてオシロスコープに入れ（オシロスコープの内部抵抗が 50 Ω になっていることを確認する。）、波形の観察の準備をする（20 mV/DIV、10 ns/DIV、トリガレベル-20mV 程度で見ること）。シンチレーチョンカウンターの信号出力端子（光電子増倍管の出力）は 2 つあるが（A1 と A2）、使わないほうは必ず 50 Ω でターミネートしておく。なお、本実験で使う信号線用の端子は、BNC と、LEMO の 2 種類があります。

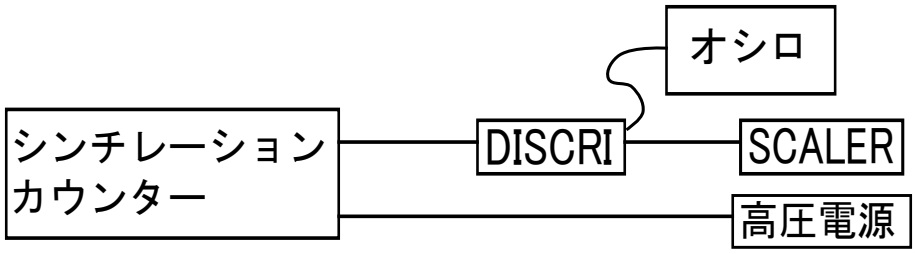


図 1: シンチレーションカウンターの配線

オシロスコープを適切に調整すると、高速で変化する波形が見えるはずである。この波形をスケッチせよ（**課題 1**）。スケッチするときは、必ず縦軸、横軸のスケールを記録しておく。特にパルスの立ち下がり時間（グランドレベルから最も電圧が低くなるまでの時間）、立ち上がり時間（電圧が最も低い状態からグランドレベルに戻るまでの時間）も正しく記録すること。必要であればオシロスコープの波形取得を停止してもよい。このパルスが明るすぎる場合は、外部から光がもれている恐れがあるので指導教員に申し出ること。

### 2.3 高電圧の設定 (1)

シンチレーチョンカウンターの光電子増倍管に与える高電圧を大雑把に決める。図 1 のように配線する。ディスクリミネーターのしきい値を最低（左一杯）にし、1 分間あたりのカウント数を計測する。また、ディスクリミネーターの出力幅は 30 ns に調整する。カウント数が 1 分間に 1500 カウントから 2000 カウント位になるように高電圧を調整する。なお、設定電圧値は $-2000$ V を超えない事 (絶対値が 2000 を超えてはいけない)。この操作を 2 つのカウンターについて行い、結果を記録する。（**課題 2**）。

スケーラーは、80 MHz SCALER を 用いて行う。ディスクリミネーターの出力信号をスケーラーに入力し、START/STOP/RESET の各スイッチを手動で操作する。時間の計測には各自の時計かストップウォッチを用いよ。

### 2.4 高電圧の設定 (2)

続いて、図 2 のようにセットし、$L_1 = L_2$ として、同時計数を行う。計数率をあげるために、2 つのシンチレーチョンカウンターは、できるだけ近づけること。上側と下側のカウンターをそれぞれ中央付近まで移動させて近づける。カウンターを動かす際には 2 人以上で行い、カウンター本体やケーブルのコネクタ部分を架台等にぶつけないように注意すること。コインシデンスの出力幅は 50 ns に調整する。以下の操作において、**設定電圧値は $-2000$ V を超えないこと。**

CH.1 及び CH.2 の設定電圧値を 2.3 で決めた値に設定する。そして、CH.1 の電圧値を $\pm 0$ V, $\pm 50$ V, $\pm 100$ V, $\pm 150$ V, $\pm 200$ V と変化させ、各 5 分間同時計数を記録して表を作成しグラフに表せ（**課題 3–a**）。なお、コインシデンスの出力をオシロスコープのチャンネ

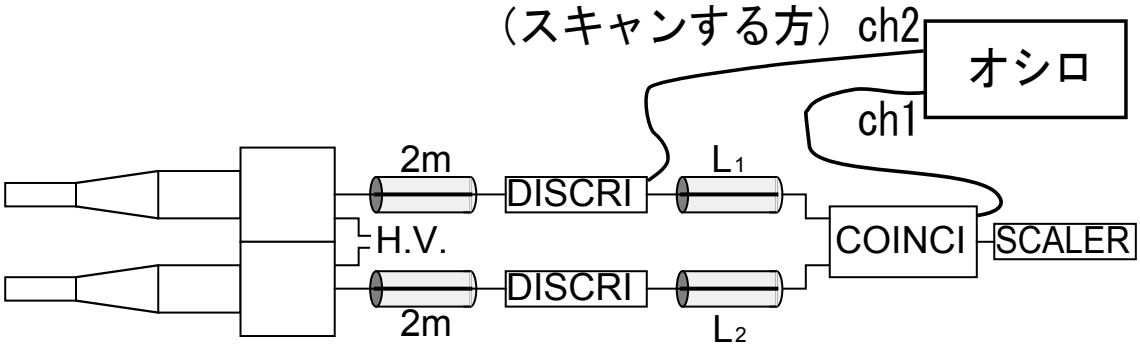


図 2: 2 つのシンチレーションカウンターの同時計数

ル 1（トリガソースにする）に入れ、電圧スキャンする方の PMT のディスクリ出力をオシロスコープのチャンネル 2 に接続して、電圧スキャンしている PMT のシングルレートが高くなりすぎていないことをモニターすると良い。また、測定中にカウンターの位置や傾きが変わらないように注意する事。2.6.1 を参照して、正しい誤差棒をつけること。電圧に対する計数の変化の緩やかな領域 (プラトーと呼ぶ、図 11C 参照) のまん中あたりの測定点を選び、CH.1 の最終設定電圧値として採用する。（ログノートに記録する。）CH.1 をその最終設定電圧値に設定して、同様の測定を CH.2 についても行い、CH.2 の最終設定電圧値も求める（**課題 3–b**）。

なお、プラトーが確認しにくい場合には、±200 V を超えた範囲の測定を行ってもよい。この場合、測定時間は 5 分間より短くてもよい。（測定時間を記録しておくこと）

測定中オシロスコープで時間幅 40ns/div で、PMT が noisy がどうかモニターして表に記録する事。(例：×：noisy[常に複数のシグナルが出続ける場合]、△：怪しい [たまに 2 つのシグナルが出る場合]、○：きれい [シグナルが 1 つしか出ない場合]) 電圧を上げて (=電圧の絶対値を増やす) 行く際に、品質が、「×：noisy」になった場合には、実際の計数がそれほど上がっていない場合でも、その電圧はプラトーを通り越して noisy 領域に入ったとみなしてよい。

この測定終了後は、CH.1 と CH.2 は、常に、それぞれの最終設定電圧値で使用すること。

## 2.5 遅延時間の設定

次に、PMT に最終設定電圧値をかけた状態で、コインシデンスの入力パルスのタイミングを揃えるために、2 つの信号間のタイミングの調整を行う。

以下を行う前に、どのコインシデンスを使用していたか、記録する事。図 2 のセットアップを修正して、オシロスコープのチャンネル 1 にカウンター CH.1 のディスクリ出力 ($L_1$ の長さのケーブルの後) をいれ、チャンネル 2 にカウンター CH.2 ($L_2$ の長さのケーブルの後) のディスクリ出力をいれる。CH.1 でトリガーをかけたとき、CH.1 と CH.2 の信号がほぼ同時になるようにしたい。時間差は、それぞれの矩形波信号の始まり側 (左端の下向きエッジ) で測定すること。

- $(L_1 - L_2)$ (ケーブル長の差) を変化させると信号間の相対的なタイミングが変化することを確認し、ケーブル長 1m が何 ns に相当するか (ns/m)、有効数字 2 けたで求めなさい (**課題 4**)。測定は複数回行い、ケーブル長の差と変化する時間の間に比例関係があることを確認すること。最初は、$L_1 = L_2 = 2m$ で測定を行う事。誤差を少なくするためには、どのような長さのケーブルの組み合わせが適しているか考慮すること。

- **課題 4** で得られた情報を用いて、$L_1$ と $L_2$ の長さを調整し、タイミングがほぼ同時になるように調整しなさい。但し、$L_1$ と $L_2$ はできるだけ短くすること。最終的に採用した $L_1$ と $L_2$ はログノートに記録する。

- ケーブルの長さは 20cm 単位で測ること。なお、青色のケーブルタイで縛られている LEMO ケーブルはその状態で使用し、長さは「5m」とすること。

ここまでの課題が全て終了した後、高電圧をオフにして、オシロの電源を切る。次の測定の準備をするため、近づけてあった 2 つのカウンターを元の位置に戻す。図 3 の $l$ の長さを cm 単位で記録しておくこと。LEMO ケーブルも一旦片付ける。LEMO ケーブルの配線は、次回、同じセットアップ (長さと接続機器、ディスクリ・コインシデンスの使用したチャンネルの位置) が復元できるように、ログノートに確実に記録しておくこと。作業机の上を片づけて 1 日目の作業を終わりにする。(HV ケーブルは配線したままで良い) オシロスコープ、LEMO ケーブルなどの入ったプラケースは棚に戻す。最後に、教員又は TA に確認してもらって下さい。

## (2 日目)

まず、各装置の電源を入れて、前回決めた最終設定電圧値をそれぞれのカウンターにかける。電源を入れた時刻を記録する。PMT は電源を入れてから動作が安定するまで時間が必要であるので、ここまではなるべく早めに行う。

オシロスコープに関して、2.1 章と同様の設定を行う。オシロスコープを PMT に直接接続し、各カウンターからの出力信号が、課題 1 で記録した波形と同等であるか確認すること。シグナルチェック後、オシロスコープは棚に戻す。

次に、ログノートを参考に前回行った図 2 の LEMO ケーブルの配線を復元する。ただしオシロスコープはつながなくてよい。コインシデンスからスケーラーへのケーブルの長さは、前回決めたタイミングが同じになる組み合わせにすること。ディスクリ・コインシデンスは前回と同じ位置のものを使うこと。

### 2.6 宇宙線中の荷電粒子のフラックスの測定

ここでは宇宙線中の荷電粒子のフラックス (particles/solid angle/cm$^2$/sec) を測定する。アクセプタンス (solid angle・cm$^2$・sec) は図 3 に従って計算する。

2 つのシンチレーチョンカウンター間の距離は、できるだけ大きくなるように設置する。鉛直上方を $\theta = 0^\circ$ とし、南北方向の フラックスの角度分布を測定して、$\theta$ を横軸にとっ

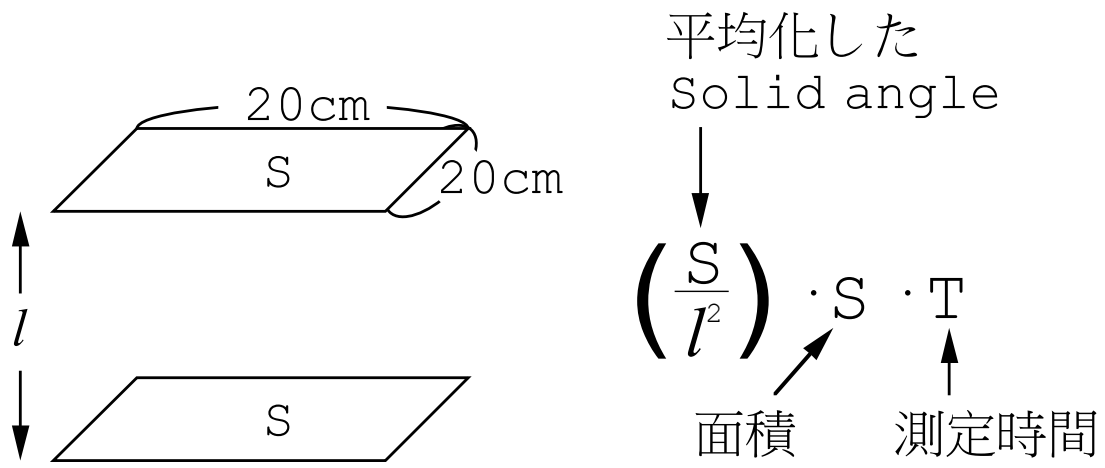


図 3: 宇宙線中の荷電粒子のフラックスの測定方法

てプロットせよ。南北の同定は壁側を北、窓側を南とする。北方向を $\theta$ のプラスとして、$\theta = 0°, \pm 15°, \pm 30°, \pm 45°, \pm 60°$ の各角度で、10 分間の測定を 2 回ずつ行う。各測定を開始した時刻を記録しておくこと。角度はデジタル角度計を用いて、架台の両側で測定する。$\pm 1.0$ 度の範囲で設定目標に一致すればよい。実際に設定した角度を記録しておくこと。

この測定の結果をテーブルにまとめる（**課題 5–a**）。テーブルには、9 種類の各角度において、実際の角度 (右、左)、各 10 分間の測定のカウント数と誤差、カウント数から求めたフラックスの値と誤差を含めること。(次の課題で使用する $\cos\theta$ やその他の値を含めてもよい) なお、電源 ON 直後で PMT が不安定な場合、カウント数が少なめに出る。最初の測定データに関して、この影響があると考えられる場合には、課題 6 の計算からは除外すること。その他にも明らかにおかしな測定データがある場合には再測定を行うこと。再測定を行った場合には再測定前の結果もテーブルに残して、おかしいと判断した根拠を説明すること。おかしい原因が明確な場合には、再測定前のデータは課題 6 の計算には含めないこと。しかし現員不明な場合には原則として全てのデータを含める。(おかしいデータを含めない場合の計算を、考察として行っても良い。) 横軸を角度、縦軸をフラックスとして、結果をプロットすること（**課題 5–b**）。

ここまでの課題が全て終了した後、高電圧をオフにする。高電圧ケーブル以外の LEMO ケーブルを全て取り外して、片づける。作業机の上を片づけて終了です。最後に、教員又は TA に確認してもらって下さい。

## (3 日目)

今回からは、実験結果のまとめと、レポート作成に取り組みます。結果のまとめやレポート作成には個人のノート PC や図書館のパソコンなどを使用しても構いませんが、授業の開始時間 (13:20) と 17:00 頃には必ず実験室に来て、教員または TA の確認を受けて下さい。

以下は 3 日目に行う課題ですが、あらかじめ自宅などで行ってきてもらっても構いま

せん。

一般に、宇宙線の角度分布は $\cos^m\theta$ に比例すると考えられている。$m$ は実数のパラメータである。**課題 5–a** のデータを用いて、$\ln|\cos\theta|$ の関数として係数 $\ln N$ を再プロットし、最小 2 乗法で $m$ の値を決定しなさい（**課題 6**）。最小 2 乗法については 2.6.2 を参照すること。結果のみではなく、導出過程の概要も示すこと。

課題 1 でスケッチした波形のおおよその電荷量を求めなさい（**課題 7-a**）。

PMT の入力が 1 フォトンで 1 つの電子を作った (1 photo electron と呼ぶ) と仮定して、PMT の増幅率 (ゲインと呼ぶ) を求めなさい（**課題 7-b**）。

得られた結果を教員または TA に確認してもらって下さい。内容の確認後終了です。早めに計算が終わった場合、引き続き 4 日目の課題に取り組んでもらっても構いません。

## (4 日目)

4 日目は、これまでに得られた結果をレポートにまとめます。**4 日目の 17:00 まで**に必ず実験室でレポートの提出をして下さい。時間が不足しそうな場合には、あらかじめ自宅などで作業を進めてきてもらって構いません。

レポートの「考察」では、特に、課題 6 で得られた、$m$ の値に関して、理論値や他の実験での測定値を調べて、この実験で得られた値と比較して下さい。考察は、目安として A4 で 1 ページ分程度行って下さい。また、参考にした情報源は「参考文献」として必ず示してください。（web サイトの場合は URL も）

なお、レポート提出の際には、レポートの内容に関して教員に説明を行ってもらいます。内容に不十分な点がある場合には返却とし、当日、もしくは翌週までに再提出をしていただきます。

以上で、実験終了です。お疲れさまでした。

## 2.7 データ解析のための補足

### 2.7.1 統計誤差

物理の実験では、測定結果に伴う誤差を常に考える必要がある。放射線等の計数では、時間的に at random に発生する事象を扱うため、計数値に統計的変動がつきまとい、ある点で $N$ カウントの測定をした場合の統計的誤差（標準偏差）は $\sqrt{N}$ であたえられる (統計学の教科書に必ず書いてある)。測定結果をグラフに表す場合は、この統計誤差（エラー棒ともいう）を必ず記入すること。また測定点を結ぶカーブを引く場合、「目のこ」といえども誤差と矛盾しない範囲で期待される形式で引くべきである（図 4 参照）。

### 2.7.2 最小２乗法

点 $x_i$ ($i$=1,2,3,...,n) で何らかの測定をして、$y_i$ ($i$=1,2,3,....,n) という結果を得たとする。また、各点での測定誤差は、$\sigma_i$ ($i$=1,2,3,...,n) である。この測定結果を $y = f(x)$ の関数で

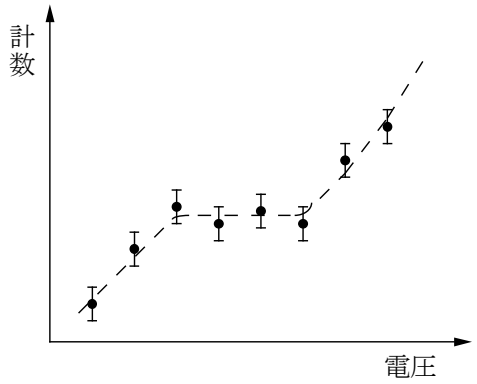


図 4: 測定結果をグラフに表すときの例

フィットすることを考える。関数 $f(x)$ には値を決定すべきパラメータが含まれている。$\chi^2$ を以下のように定義し、この $\chi^2$ が最小になるようにパラメータを決定すればよい。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - f(x_i))^2}{\sigma_i^2}$$

最も簡単な例として一次関数を考える ($f(x) = a + bx$) 。この時 $\chi^2$ 関数は、

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - (a + bx_i))^2}{\sigma_i^2}$$

となり、$\chi^2$ の最小を与える $a, b$ は次の方程式を解くことで得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi^2}{\partial a} &= -2 \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i - a - bx_i}{\sigma_i^2} = 0 \\ \frac{\partial \chi^2}{\partial b} &= -2 \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i(y_i - a - bx_i)}{\sigma_i^2} = 0 \end{aligned}$$

宇宙線のフラックスの角分布の場合は、$N$（計数）= $A|\cos\theta|^m$ である。ここで、 $A$ は定数である。両辺の対数をとると、

$$\ln N = \ln A + m \ln |\cos\theta|$$

となり、

$$\begin{aligned} y &= \ln N \\ x &= \ln |\cos\theta| \end{aligned}$$

と置き換えることで、一次関数のパラメータの決定に帰着する。但し、$y$ の測定誤差 $\sigma$ は、

$$\begin{aligned} y \pm \sigma &= \ln(N \pm \sqrt{N}) \\ &= \ln N + \ln\left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{N}}\right) \\ &\approx \ln N \pm \frac{1}{\sqrt{N}} \end{aligned}$$

と近似することにより、

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

となる。

# 3 実験装置について

## 3.1 素粒子実験の同時計数

原子核や素粒子の実験には、粒子の検出が必要不可欠である。荷電粒子は、その粒子の持つエネルギーに応じて、物質中を通過する際に近接する原子や分子をイオン化（自由電子と正イオンの対）したり、半導体の中では伝導電子と空孔の対を作る。これらの現象を利用して、荷電粒子の通過を検出する装置には、シンチレーションカウンターと半導体検出器とがある。両者には各々長所と短所とがある。一般的に言えばシンチレーションカウンターは大きな立体角を必要とするときや高速（0.1 msec 以下）の応答を必要とする場合に適している。一方、半導体検出器は粒子のエネルギーを高い精度で測定する場合に適しているが、その反面、用途が限られる。

この測定ではシンチレーションカウンターに限って実験を行う。その中でも応答速度の非常に速い（数 ns）プラスチックシンチレーション・カウンターを使用する。

さて、シンチレーションカウンターは粒子の通過した瞬間に高速の電気信号を送り出すが、このような高増幅作用（典型的には $10^6$ 倍程度）をもつ装置に固有な雑音の問題に対処しなければならない。雑音と信号とを尖頭電圧値（波高）を用いて弁別する回路がディスクリミネーター（Discriminator）回路と呼ばれているもので、この回路を通ると、ある波高よりも小さい入力パルスに対しては出力パルスを発生せず、他方その波高値（時には閾値 — スレッショルド（Threshold）とも呼ばれる）以上の入力に対しては規格化されたパルスを出力端子から送り出すように作られている。

このようにして、荷電粒子の通過が電気信号に置き換えられた後は、数カ所に置かれたシンチレーションカウンターを、どのような空間的な関係（角度分布）を有して、どのような時間関係（同時計数または遅延をともなう計数）で荷電粒子が発生、または通過したかを高速論理回路で判断する。この論理回路の基本になるのが同時計数回路（コインシデンス（Coincidence）回路）と呼ばれているもので、電子計算機等に用いられる AND-GATE（アンド・ゲイト）を高速化したものに他ならない。コインシデンス回路はある時間間隔に２つ以上の全入力端子にパルスが入った時にだけ出力パルスが出るようになっている。いま、２つのシンチレーションカウンターに少しの時間間隔をへだてて粒子が通過するような現象を調べようとすれば、一方のシンチレーションカウンターのパルスの経路に適当な長さの同軸ケーブルを挿入して信号を遅延させればよい。

この実験では、以上に述べた道筋にそって天頂から降ってくる宇宙線（一般には種々の素粒子、例えば、μ粒子、電子、陽電子、ガンマ線、陽子、中性子、π中間子などが含まれるが、この実験で計測にかかるものはほとんどがμ粒子と考えてよい）の強度を２枚のシンチレーションカウンターの同時計数により測定する。

### 3.1.1 シンチレーションカウンター

この実験で用いるシンチレーションカウンターは、プラスチックの中に有機溶質を溶かしこんだ固溶体であるプラスチックシンチレーターと、その中で出る螢光を全反射等を利用して 集光するライトガイドと、その光を光電効果を利用して電子に変換し、２次電子増幅を繰り返す光電子増倍管からなる（図 5A)。

いま、プラスチックシンチレーターの中を荷電粒子が通過したとする。その道筋にはイオン化されたり、励起状態に上がった分子が残る。これらの分子はその励起状態の持つエネルギーの一部を光として、粒子の通過後、数 ns の間に放出する。放出された光の一部は、プラスチックシンチレーターの表面で全反射を繰り返しながらやがて光電子増倍管の光電陰極（フォトカソード）に到達する。

光電子増倍管はフォト・カソードと一般には 10 段またはそれ以上の２次電子増倍用のダイノードと増倍された電子を集める陽極（アノード）とからなる（図 5B)。ライト・ガイドから出てくる光子（フォトン）の数は通常数千個に及ぶが、その内の一部（量子効率）がフォト・カソードで光電子を作る。この数十個の電子を加速しては 2 次電子増幅を繰り返し、最終的には数 mA の電流として、陽極（アノード）から外に取り出される。このパルス電流は非常に時間間隔の短いものなので、注意深くオシロスコープを操作しないと見えない。

### 3.1.2 ディスクリミネーター回路

ディスクリミネーターとはある一定の電圧（ある範囲で調整可能）以上のピーク電圧を持った入力パルスに対しては一定の電圧値、一定の時間幅（一般には調整可能）の出力パルスを送り出すように作られた回路である。そして、このスレッショルド値（しきい値）や出力パルスの形は、できるだけ入力パルスの波形によらないことが望ましい。この実験で使用するディスクリミネーターは、現在最先端の素粒子実験で実際に使用されているもので、スイッチング速度１～２ ns という ECL シリーズの超高速 IC（集積回路）を用いた回路構成がなされており、図 6A に機能図が示されている。

この回路について説明する前に、まず原子核関係の実験等に用いられる高速論理回路の標準規格に触れておく。これは NIM 規格（Nuclear Instrument Modules Standard）と呼ばれ、1966 年に米国の原子力エネルギー委員会（AEC）で採用され世界に広まったもので、信号レベル、信号線、コネクター、電源、回路を収めるケース等についての標準規格である。これに沿って製作された回路（モジュールと呼ぶ）は世界中どの研究所へ持って行っても使用可能である。NIM 規格では同軸ケーブルの特性インピーダンスは 50 Ωを使用する事になっており、論理”1”は－ 0.7V（従って 50 Ωの負荷に 14 mA の電流)、論理 ”0” は 0V と定められており、この論理レベルを通称、NIM レベルと呼ぶ。

ではディスクリミネーターについて説明する。図 6 を参照しながら読むように。入力信号はリミッター（過大な入力信号から回路を保護する）を通過した後、コンパレーターで、しきい値電圧と比較され、しきい値よりピーク電圧（の絶対値）が大きい場合、入力パルスの続く間、通常、低レベルの $\bar{Q}$ が高レベルに変化する。ところで、ECL 集積回路の論理レベルは NIM レベルと異なり、論理”1”レベル（高レベル）が－ 0.9 V、論理 ”0” レベル（低レベル）が－ 1.75 V となっている。この $\bar{Q}$ の低→高のレベル変化はフリップ・フロッ

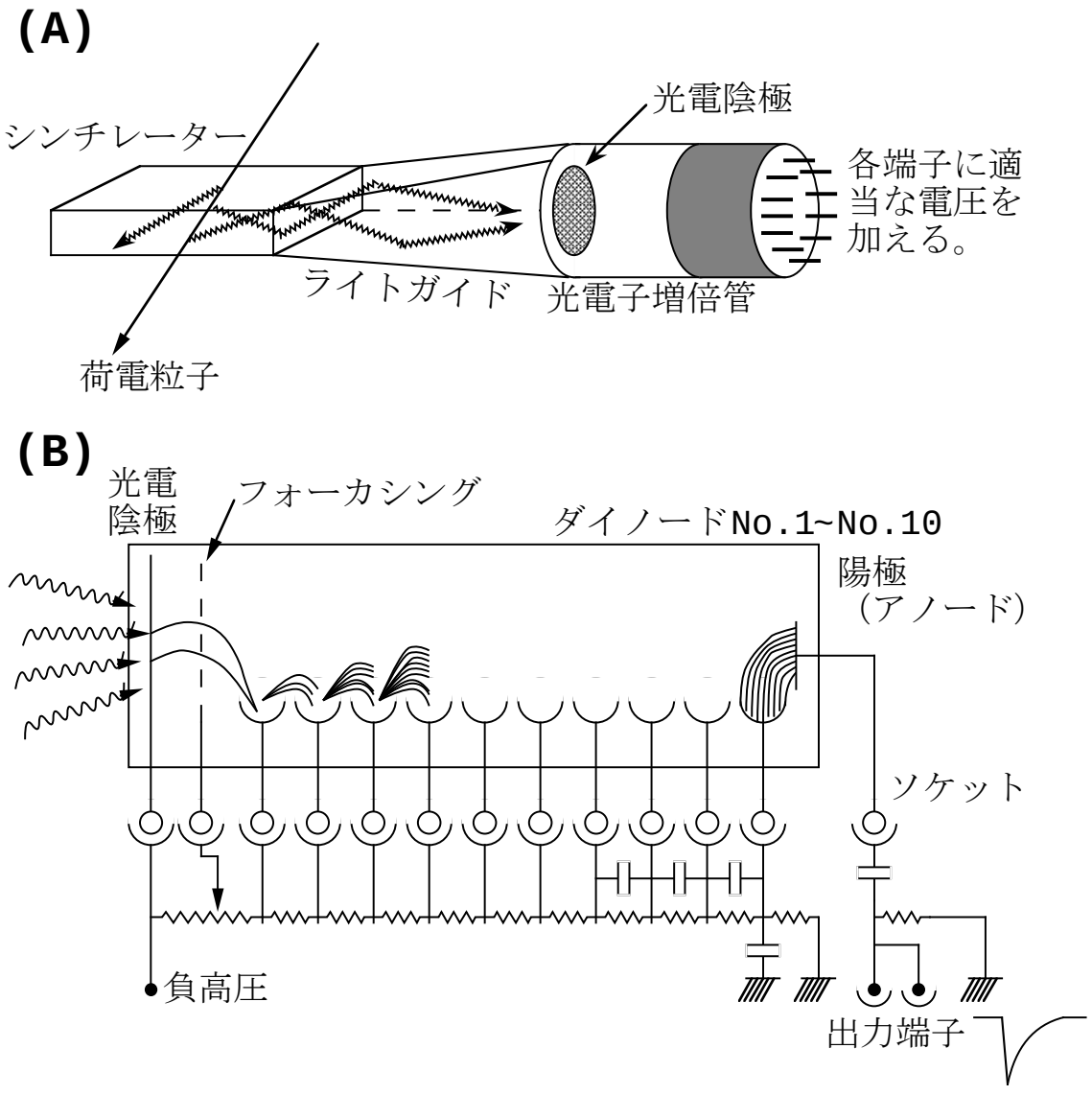


図 5: シンチレーションカウンター (A) と光電子増倍管 (B)

プをトリガーして $Q$ に低 → 高のレベル変化を起こし、これが ECL→NIM のレベル変換回路を通って NIM レベル出力として取り出される。一方、フリップ・フロップの $\bar{Q}$ は高→低の変化をするはずだが、コンデンサー C と定電流回路に接続されており、C を通して定電流回路を電流が流れるに従って、ゆっくりと電圧が下がり、やがて NOR ゲートの高 → 低変化のしきい値に達するとフリップ・フロップにリセット信号が印可されて $Q$ が高 → 低と変化し、出力 "1" レベルが打ち切られる。従って、定電流回路を流れる電流を可変抵抗で調節することにより出力パルスの幅を変えることができる。フリップ・フロップは D 入力が低レベルの場合、コンパレーターからの入力があっても $\bar{Q}$ が変化しないので、Veto 入力が NIM レベル "1" の間はディスクリミネーターとしての動作を停止する。このような機能も実際の実験には要求されることがある。

### 3.1.3 コインシデンス回路

コインシデンス回路は、論理回路の一種で、短い（数 ns から数 10 ns）分解時間をもっている AND 回路ということが出来る。このコインシデンス回路は 1930 年に Bothe と Rossi により作られて以来、色々の素子を用いた回路が使われてきたが、ここではその原理を学ぶため、まず一番簡単なダイオードを用いたロッシ型コインシデンス回路を調べてみる。ロッシ型コインシデンス回路は、２つの非線形素子（例えば真空管とかトランジスタとかダイオード）を用いて２つの入力を混合し、２入力が同時（もちろんある時間間隔内で）の場合と同時でない場合に、応答が異なるようになっている（図 7A）。普通はこのようなロッシ型の回路の後に波高弁別機能を備えたパルス整形回路を組み合わせて一台のコインシデンス回路とする。ここで使用するロッシ型コインシデンス回路はダイオードを 2 個用いた加算回路（ADDER）に他ならず、図 7B のように２入力が同時に入った場合は１入力だけの時よりも 2 倍の電圧が出るようになっている。これを波高弁別回路を通して、２入力が同時の場合と１入力だけの場合を弁別するわけである。

実際に宇宙線の測定に使用するコインシデンス回路は ECL 集積回路を用いて図 のような方式を採用している。実際の回路図は図 8 に示されている。出力パルス幅の決定方式はディスクリミネーターの場合と同じである。このコインシデンス回路は４重のコインシデンスと１重のアンチコインシデンス（Veto）が行え、不必要な入力チャンネルはスイッチを OFF にしておけば良いようになっている。アンチコインシデンスは、ある条件の場合には計数したくない、という時に使用する。

### 3.1.4 可変遅延線

コインシデンス回路に入れるべき 2 入力のタイミングを合わせる為に、可変遅延線を用いる。これは遅延時間 1ns、2ns 等の長さの同軸ケーブルにスイッチをとりつけて、ON の時はパルスが同軸ケーブルを通過し、OFF の時にはバイパスするようにして、必要な遅延時間を得るようになっている。

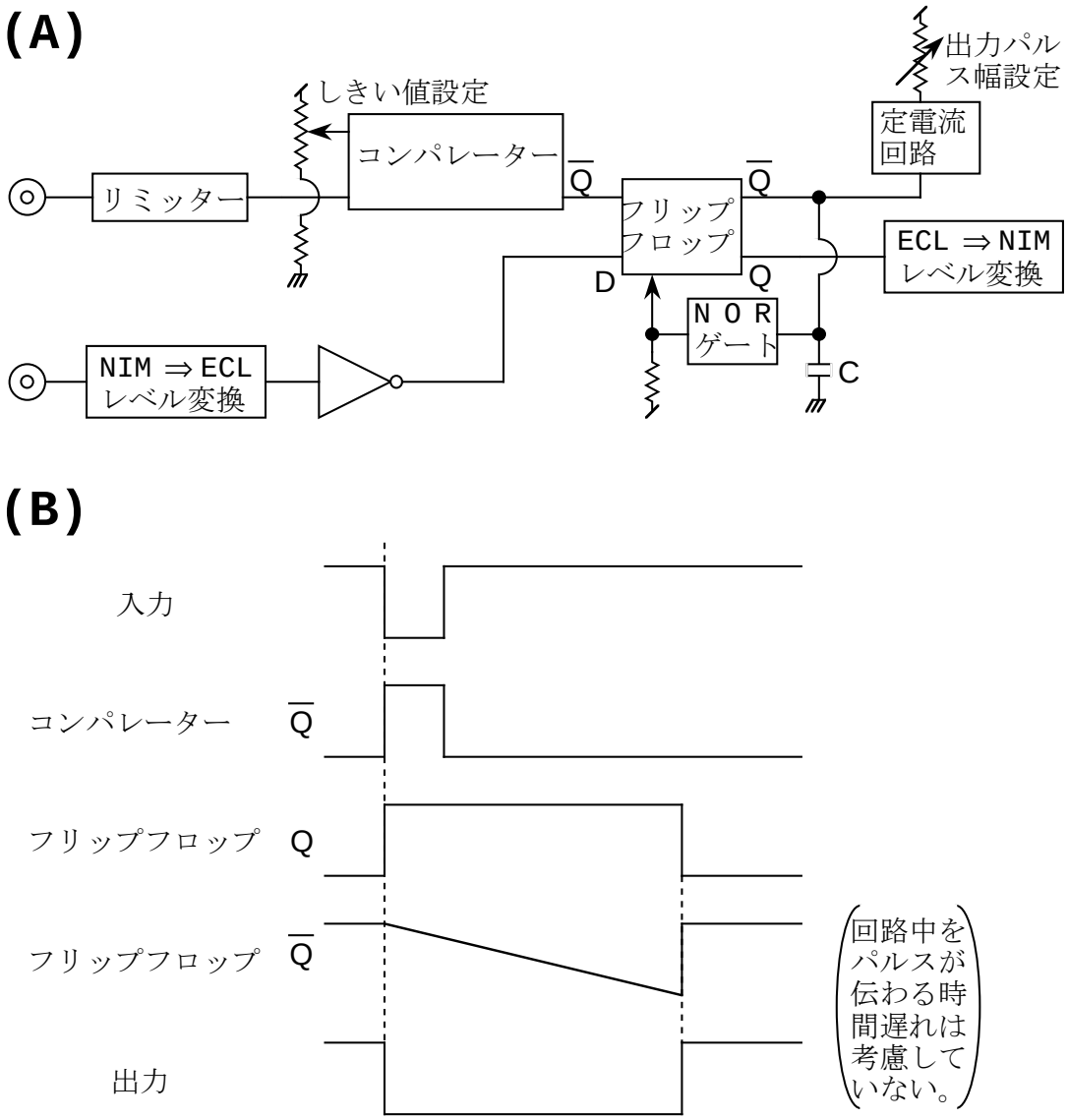


図 6: ディスクリミネーターの機能図 (A) と各部の波形 (B)

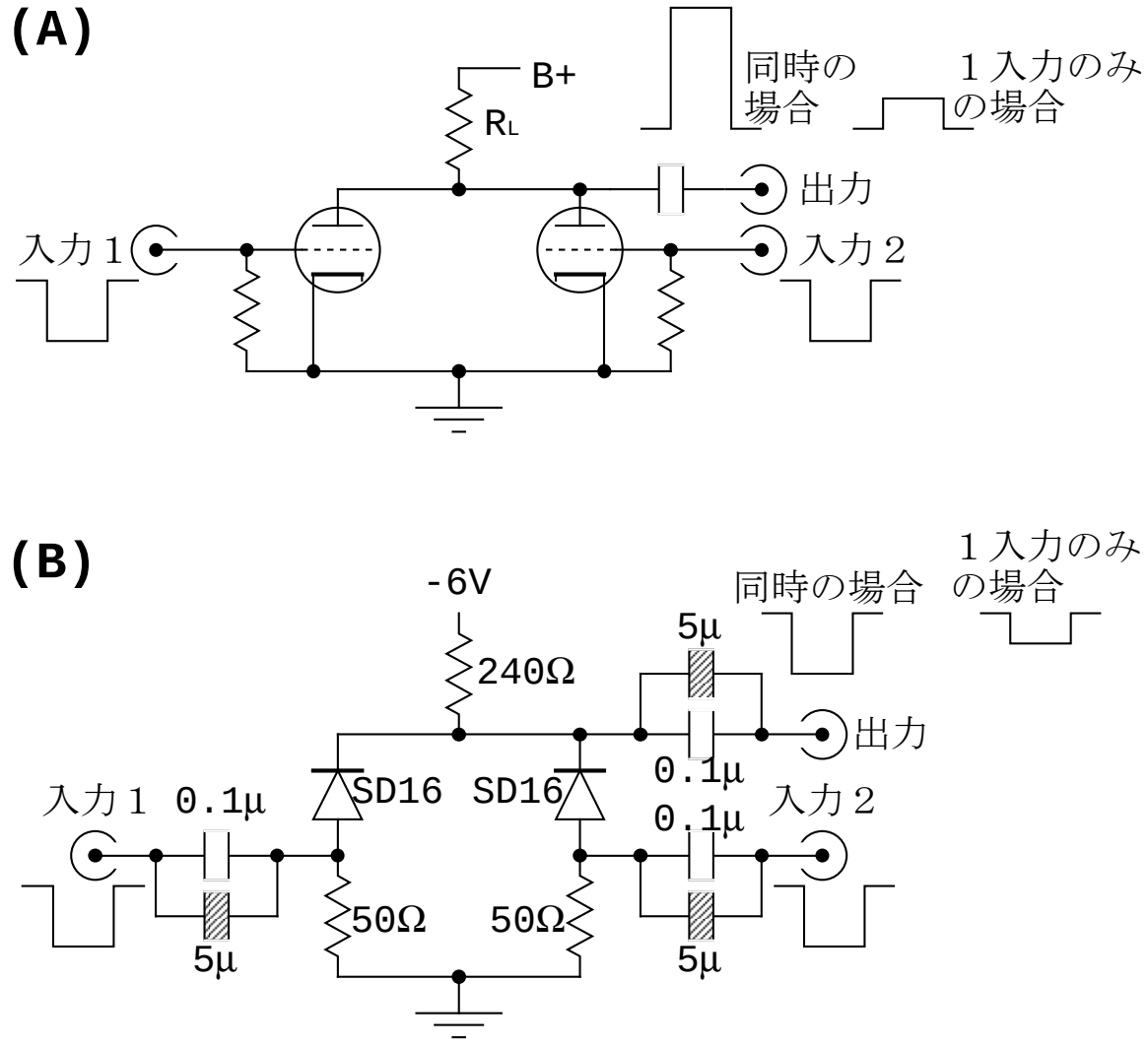


図 7: コインシデンス回路の例

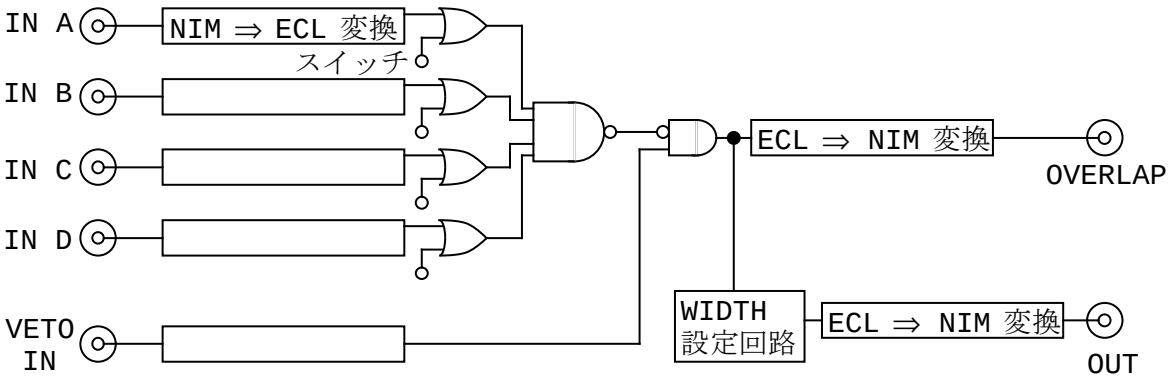


図 8: コインシデンス回路の機能図

### 3.1.5 計数回路（スケーラー）

計数回路は、基本的にはフリップ・フロップと呼ばれる２進計数回路の組合せで作られており、これに２進ー 10 進の変換回路と表示回路、スタート・ストップ等の制御回路が加わって構成されている。ここで使う計数回路はいろいろな機能を持っているが、この実験では LOCAL モードで使用する。最大 10 進６ケタの計数が可能だが、オーバーフローすると CARRY シグナルが出力され、これを別の計数回路につなぐことにより６ケタ以上の計数も出来る。INHIBIT は使用しない。

### 3.1.6 実際の素粒子実験での使用例

今まで学んで来たように、ディスクリミネーターとはある定められたしきい値より低い波高を持つパルスに対しては何も出力を出さず、そのレベルより高い波高を持つパルスに対しては、その入力パルスの幅、高さに無関係に、一定の高さと幅を持つ出力パルスを送り出す回路である。これは放射線計測に固有なノイズ（雑音）を出来る限り落としたり、また場合によっては粒子の判別、エネルギーの判別にも用いられる。

コインシデンス回路はディスクリミネーターを通った後に用いられるのが通常で、２つの入力パルスが同時に来たかどうかの判別をする機能を持つ。この機能は単に時刻が（ある時間幅内で）同時であるという判定のみならず、種々のカウンター（例えばエネルギーを測定する装置としてのシンチレーションカウンター、粒子の速度を測定判別するチェレンコフカウンター、粒子の運動量を測定する磁石と組み合わされたカウンター、ある粒子を識別するシャワーカウンター等々）の組合せで論理回路を構成する重要な一因となる。

次に実際の素粒子実験で用いられた例を示す。図 9 のようなカウンターと磁石の配置で、

①AND③AND⑤AND⑦で荷電 + の粒子（$A^+$）

②AND④AND⑤AND⑥で荷電 − の粒子（$B^-$）

⑧のカウンターまで届かないと B は重い粒子（$\pi^-$）

⑨のカウンターまで届かないと A は重い粒子（$\pi^+$）

シャワー・カウンターでシャワーを作ると B は電子（$e^-$）

シャワー・カウンターでシャワーを作ると A は陽電子（$e^+$）

シャワー・カウンターでシャワーを作らないと B は $\mu^-$

シャワー・カウンターでシャワーを作らないと A は $\mu^+$

すなわち、

$K_L \to \pi^+\pi^-$ では

(①AND③AND⑤AND⑦) AND (②AND④AND⑤AND⑥) AND(NOT⑧) AND (NOT⑨)

$K_L \to \pi^+\mu^-\nu$ では

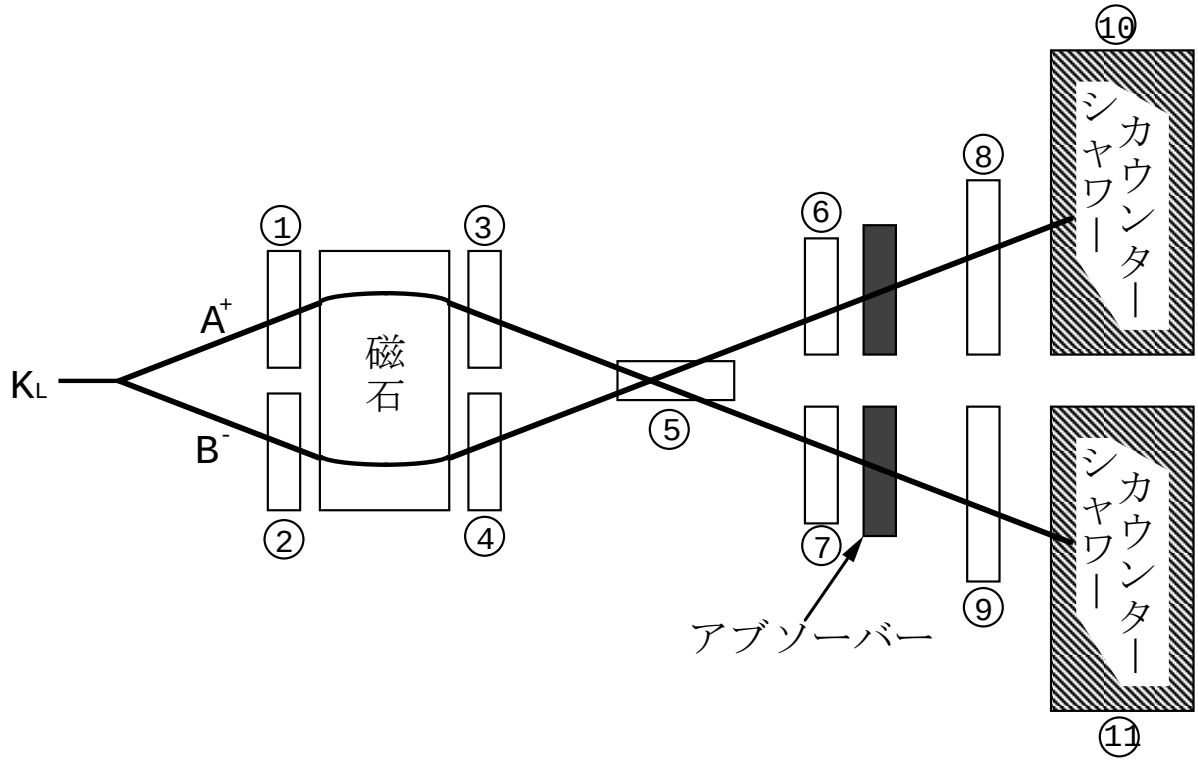


図 9: 素粒子実験の一例

(①AND③AND⑤AND⑦) AND (②AND④AND⑤AND⑥) AND (NOT⑨) AND ((⑧AND (NOT⑩))

$K_L \to \pi^+ e^- \nu$ では

(①AND③AND⑤AND⑦) AND (②AND④AND⑤AND⑥) AND (NOT⑨) AND (⑧AND⑩)

のようになり、この AND がコインシデンス回路となる。

### 3.1.7 宇宙線のコインシデンス計数

宇宙線についての詳しいことは、例えば、「宇宙線」、小田稔著、裳華房 (1960) の第 6 章を読むことをすすめる。最近では、「宇宙素粒子物理学」、C. グルーペン著、シュプリンガー・ジャパン (2009) も詳しい。

宇宙線は地球外部から地球の大気層へ降りそそぐ一次宇宙線が大気層に突入してエネルギーを失うとともに複雑な反応を起こして粒子数をふやしたり、一次宇宙線とは異なる粒子を発生しながら地表に到達する。このようにして、地表近くに到達する宇宙線は二次宇宙線と呼ばれる。一次宇宙線は大部分（約 9 割）が陽子であり、残りが He 等の軽い原子核である。このような核子は空気中の原子核と衝突して核子カスケードを起こす。その際にでる中間子のうち $\pi^0$ はガンマ線に崩壊し、そのガンマ線は電子・陽電子対を作り、$\pi^+$ や $\pi^-$ はさらに空中の原子核と衝突したり、$\mu^+$ や $\mu^-$ に崩壊する。この様なカスケードの他にガンマ線、電子、陽電子等の関係した電子カスケード・シャワーも起こる。この大気中での宇宙線現象の代表例 2 つを次々に引き起こした後に、地表に達した頃には、大部分が $\mu$ 粒子（$\mu^+$ と $\mu^-$）、電子、陽電子、ガンマ線のいずれかになっている。この内、ガンマ線は電荷を持たないため我々の観測にはかからない。

さて、宇宙線の強度は、天頂角によって変わるし、時刻や地球の磁場等の影響をうける。ある方向からくる粒子の強度は、その方向を含む単位立体角から入射して、単位面積を単位時間に通過する粒子の数で表す。従って、単位としては $\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{sec}^{-1}\mathrm{str}^{-1}$ を使う。その際、平均的な方向が天頂角方向から何度ずれていたかを記録しておくこと。

### 3.1.8 荷電粒子の電離損失

ここで、シンチレーションカウンター等による荷電粒子検出の原理をもう少し詳しく説明する。荷電粒子は物質中を通過する際に、物質中の原子をイオン化したり励起状態に遷移させ、自分自身はエネルギーを失ってゆく。これを電離損失といい、励起状態の原子が基底状態へ戻る時に放出する光や、イオン化の際に生じる自由な電子を増幅して信号として取り出せば荷電粒子が検出可能となる。

電離損失の程度は、荷電粒子の種類、エネルギー、通過する物質の種類等に依存するが、これらを定めても一定ではなく、Landau 分布と呼ばれる分布をする（図 10A）。これは荷電粒子がエネルギーを失う過程が統計的変動を伴うものであることによる。この分布の最も頻度の高い電離損失を、most probable なエネルギー損失と呼ぶ。図 10B に空気中を通過する場合の most probable なエネルギー損失を示す。この図から、粒子の種類が違えばエネルギーの損失の大きさが違い、また粒子のエネルギーが低いと損失は大きく、エネル

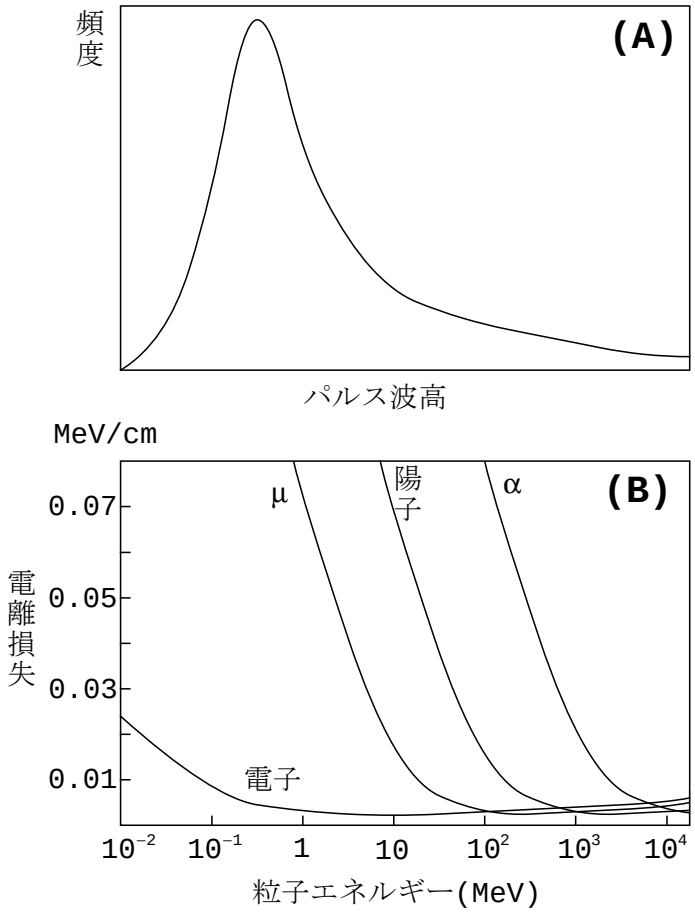


図 10: Landau 分布と空気中での荷電粒子の電離損失

ギーが増加するに従って減少し、最小点を通過した後、漸増する（relativistic rise という）ことがわかる。

これを利用すると、カウンターを通過する粒子の運動量が知られており、かつ、余り高くない場合には、カウンター中での電離損失の大きさを測定する（電離損失はカウンターからの出力パルスの波高に比例する）事により、粒子の種類を定めることが出来る。また、カウンターを通過する粒子の種類が判明している場合には、電離損失の大きさにより、エネルギーを推定できる。

### 3.1.9 同時計数の実際

この実験で行うシンチレーションカウンター２個を用いた同時計数（図 11A）は最も簡単なものであるが、注意深く調整を行わないと、荷電粒子を確実に計数することはできない。

まず、第一段階として、光電子増倍管に印可する高電圧を決定する。光電子増倍管に無理をかけない為、また、雑音を小さく押さえるために高電圧はなるべく低くしたいので、

通常ディスクリミネーターのしきい値は最低に設定する。この実験で用いるディスクリミネーターのしきい値は −25 mV まで下げられる。この設定は以後変えてはならない。

光電子増倍管に、ある電圧をかけた時の出力パルスの波高分布を考えると、荷電粒子が通過したことによる信号と、雑音の重なり合った、図 11B のような分布が得られる。信号の波高分布はカウンター中での粒子の電離損失に（リニアリティーが保たれる範囲で）比例するので、カウンターを通過する粒子の種類やエネルギーの分布によって定まる。雑音の間から信号だけを取り出す為に、同時計数を行うわけである。

今、カウンター１の光電子増倍管にかける電圧は正しく調整されているものとし、カウンター２の電圧を適当にとった場合、カウンター２の出力パルスの波高分布が図 11B であるとし、カウンター２に接続されるディスクリミネーターのしきい値が、図中、L の位置にあるとする。すると同時計数を行っても、信号の一部（しきい値以下の部分）は数え落とされてしまう。そうならない為にはしきい値を L’ 以下にしなければならないが、既に L が最低レベルであれば、それ以下にはできない。そこで光電子増倍管にかける電圧を上げると、増幅度が上がり、波高分布は形を変えず（もちろん、リニアリティーの保たれる範囲で）波高の高い方へ移動する。こうして、信号波高分布が全部 L を越えると、荷電粒子を完全に計数することになる。この様子が図 11C に示されてある。光電子増倍管にかける電圧を更に上げると、L を越える雑音の数が指数関数的に増大して、2 つのカウンターで雑音同志が偶然同時に発生する（これを偶然同時計数という）頻度が上がり、同時計数の数はやがて増加し始める。計数が信号だけを 100%捕らえている平らな部分をプラトー（plateau）という。電圧の設定はプラトーの中央部に置くようにする。

荷電粒子を完全に計数するには、実はまだ考えなければならない要素がある。図 11A のように、全く同じカウンターや回路やケーブルの配置をしても、カウンター 1 から来る信号パルスと、カウンター２から来る信号パルスがコインシデンス回路の入力に同時に到着するという保証はない。この主な原因は、光電子増倍管を信号が通過する時間（数 10 ns）が、電圧に依存する事にある。つまり、2 個の光電子増倍管にかける電圧が異なると、信号の通過時間も異なる。その他、カウンター１とカウンター２の距離が離れていると、粒子の通過時間の違いも問題になる。これを補正する為に、わざと図 11D のように一方に可変遅延線を加え、他方のケーブルを少し長めにしておく。そして、遅延時間を変えながら計数を行うと、図 11E のようなカーブが得られるので、平らな部分（プラトー）の中央部に設定する。このカーブの両側が、シャープに落ちないのは、信号が光電子増倍管やディスクリミネーターを通過する時間が、信号自身の波高に依存したりして、タイミングが揺れ動く（タイム・ジッターという）ことによる。もし、カウンター 1 とカウンター２の距離が離れていて、これを通過する粒子の速度が一定でない場合には、通過時間の違いの方がタイム・ジッターより大きくなることもある。更に、カウンターの大きさが大きい場合には、粒子の通過位置（カウンター中での発光位置）から光電子増倍管に光が届くまでの時間の違いも効いてくる。プラトーの中央部に設定値を置くことにより、これらの影響を避けて完全な計数ができる。

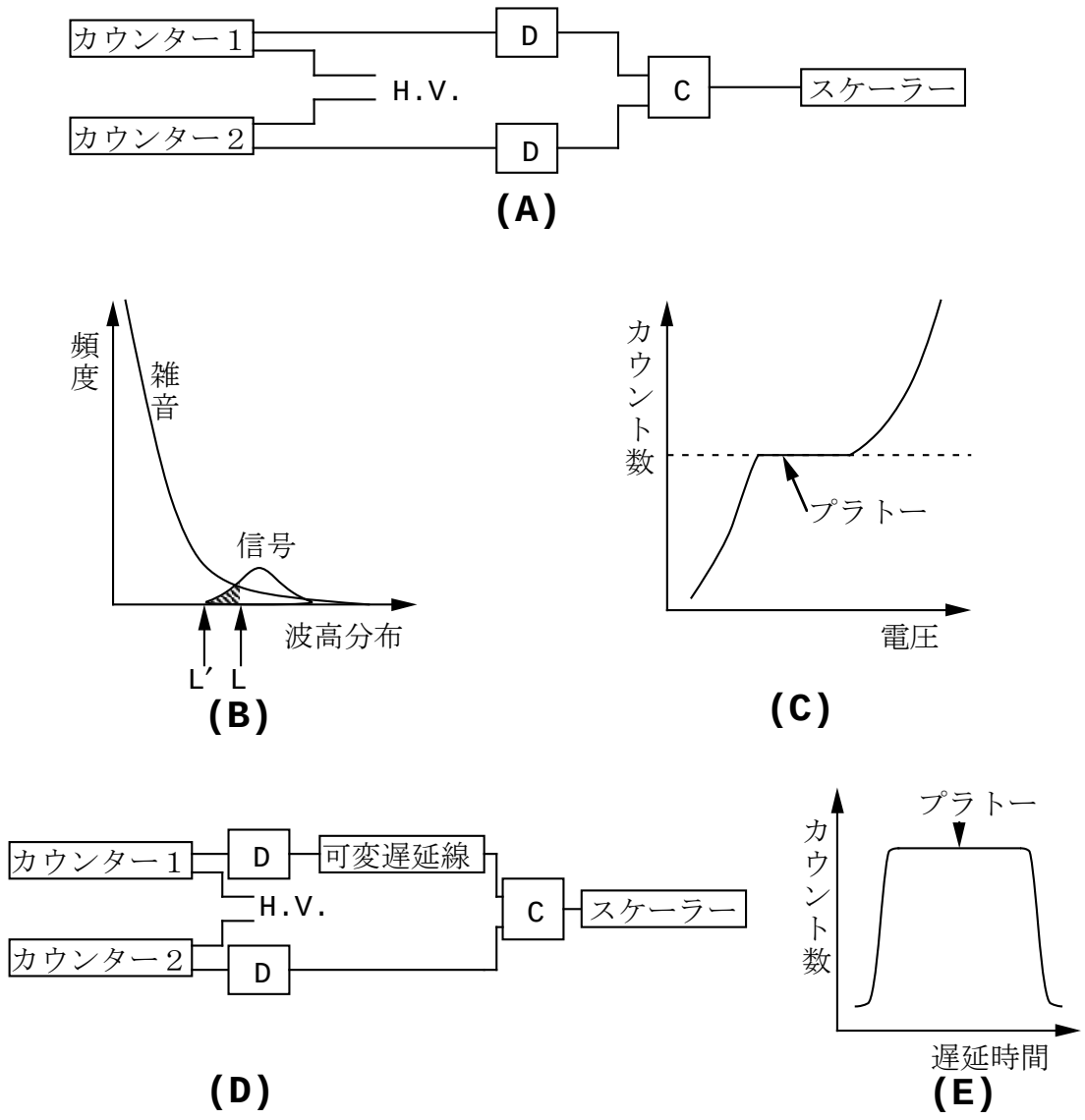
カウンター１
D
H.V.
C
スケーラー
カウンター２
D
(A)
頻度
雑音
信号
波高分布
L′ L
(B)
カウント数
プラトー
電圧
(C)
カウンター１
D
可変遅延線
H.V.
C
スケーラー
カウンター２
D
(D)
プラトー
カウント数
遅延時間
(E)

図 11: ２重の同時計数

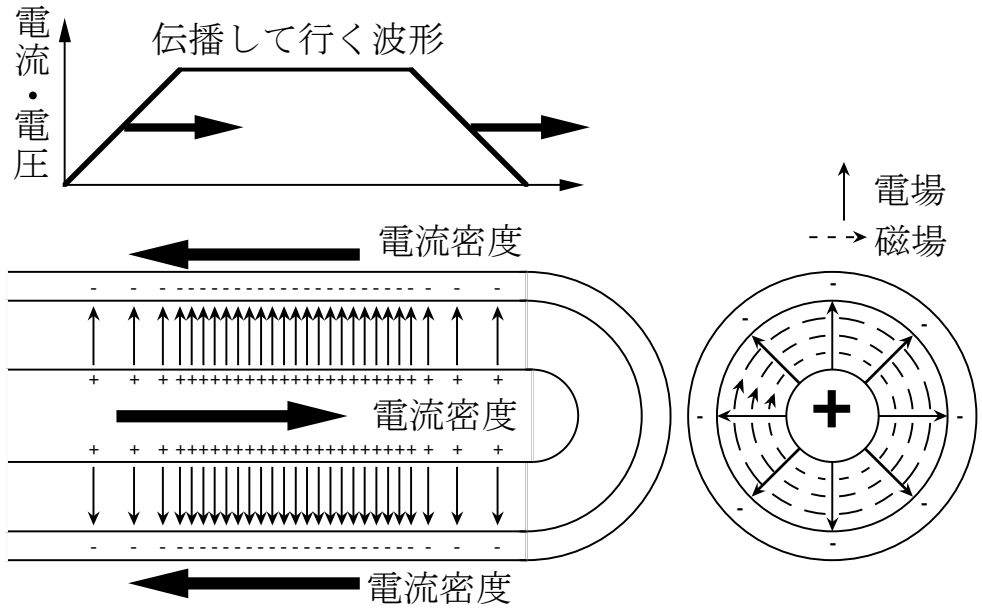


図 12: 同軸ケーブル内の電磁場・電流密度の伝搬

## 3.2 伝送線（同軸ケーブル)

### 3.2.1 同軸ケーブルと特性インピーダンス

高周波成分を含む波形の信号（数 MHz 以上のフーリエ成分を有する）を歪めることなく、一つの回路から他の回路に送るには、伝送線が不可欠である。よく見かける伝送線としては白黒テレビ・アンテナ用の同軸線（同軸ケーブル）がある。ここでは同軸ケーブルを主に取り扱う。高周波の電気信号は必ずそのまわりに電磁波をともなう。従って、そのような電磁波をゆがめることなく伝えるには、電磁気学でよく知られているように、2 つの導体が必要となる。同軸ケーブルは、中心線と、それを同心柱上に取り巻く外部導体とから成っている。これも電磁気学でよく知られているように、このような場合には、完全な平面波が伝播出来る。

今、同軸ケーブルを理想化して考えてみよう（図 12)。この境界条件のもとでは TEM モードの進行波が存在し、伝播速度は周波数に無関係で、2 つの導体の間に入っている誘電体が無限に広いとした時の伝播速度と等しい。

特性インピーダンス $Z_0 = V/I$ は実数であり－即ち、抵抗値で表され－これも周波数によらない。どのような回路がこの同軸ケーブルに結線されようと、もしこの同軸ケーブルが無限に長ければ、この特性インピーダンスで置き換えられる。さらに、もし有限の長さしかない場合でも、その終端が抵抗値（あるいは入力インピーダンス）$Z_0$ の素子（あるいは回路）に接続されていれば、そこでの境界条件は $V/I = Z_0$ という関係が満たされるため、同軸ケーブルが無限に長く続いている場合と同じになる。この事を終端がマッチしているとか、マッチングがとれているとか、ターミネートされているとか呼ぶ。この様子は、中心線と外部導体を流れる電流（各々逆方向をむいている）と、この 2 つの導体の間の電位差とが、同軸ケーブル内のどの断面でもどの時刻においても $V/I = Z_0$ という関係を満

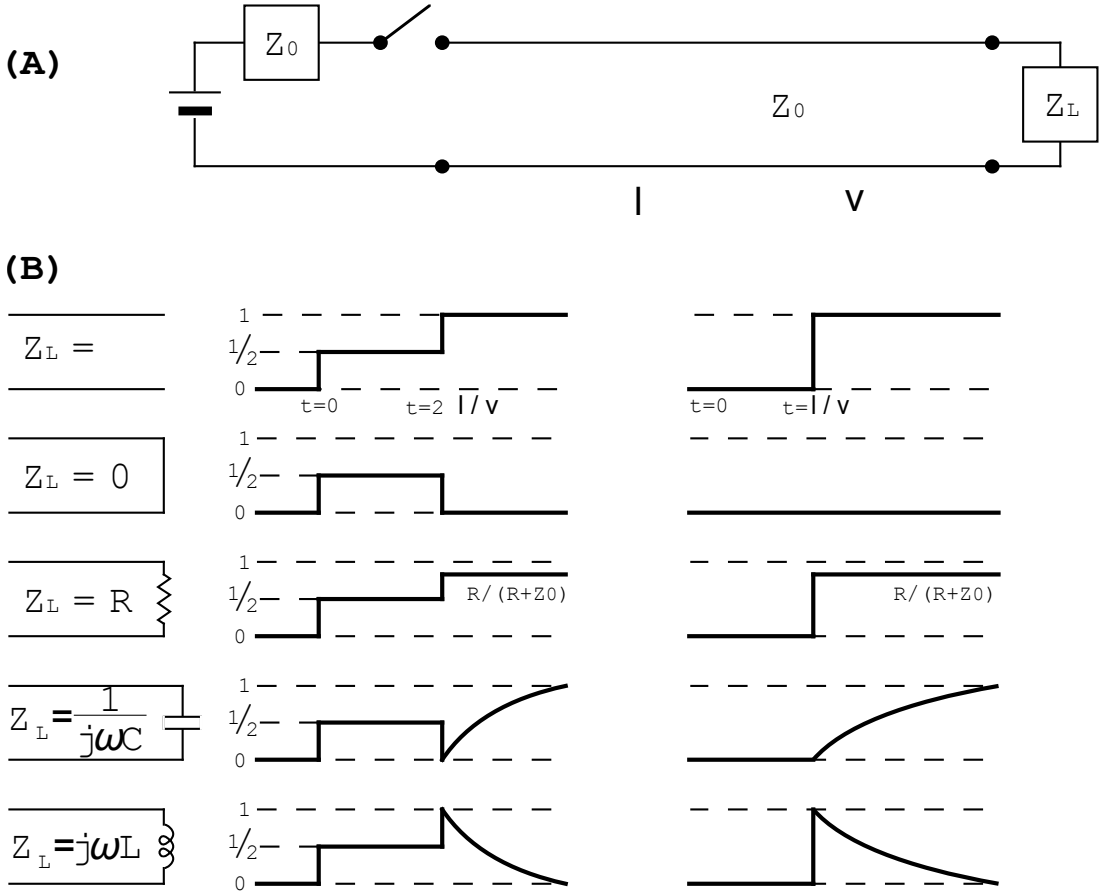


図 13: 同軸ケーブル中のパルスの伝搬

たしており、また $V$ と $I$ の間にはこれ以外の条件はないことからも理解できる（図 13）。

同軸ケーブルは単位長さあたりのインダクタンス $L$ と容量（キャパシタンス）$C$ で、等価的に図 14 のように表せる。そして、$T$ を単位長さあたりの遅延時間（伝播に要する時間）とすると

$$T = \sqrt{LC} = \sqrt{\varepsilon\mu} = \frac{10}{3}\sqrt{K_e K_m}\ \mathrm{ns/m}$$

で表せる。ここに $K_e = \varepsilon/\varepsilon_0$、$K_m = \mu/\mu_0$ である。そして特性インピーダンスは $Z_0 = L/C$ で表される。

### 3.2.2 同軸ケーブルのパルスに対する反応

理想的な同軸ケーブルというものは、電気的信号を TEM モードで減衰させることもなく歪めることもなく伝送できる。しかし、現実の同軸ケーブルは信号の中に含まれる周波数成分が高周波になればなるほど、その成分に対して大きな減衰を与える。従って、パルス信号全体としては歪んでしまう。この度合は、同軸ケーブルのカタログなどに、周波数

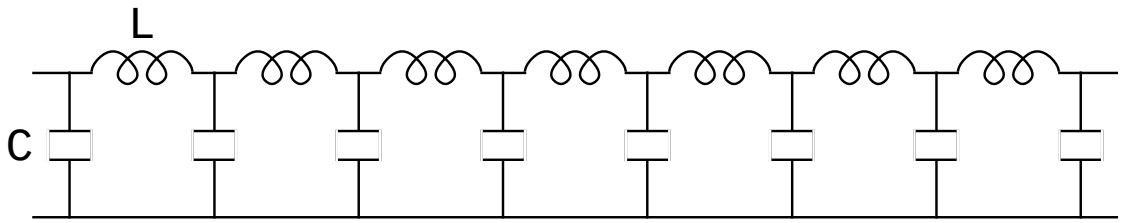


図 14: 同軸ケーブルの等価回路

の関数として印刷されている。おおざっぱに言えば、特性インピーダンス 50〜75Ω のもので外部導体の内径が 3 mm ぐらいあれば 20〜30 m ぐらいの長さ（遅れにして 100〜150 ns）までは大した問題はない。

高周波成分を含む電気信号（パルスであれサイン波であれ）をある回路から次の回路に送る時には、その終端につく回路の同軸ケーブル側から見たインピーダンスに注意しなければならない。回路 A から信号を回路 B に送る時には、まず、回路 B の入力インピーダンスを使用する同軸ケーブルの特性インピーダンスに合わさねばならない。さもないと、回路 B の入力端子で反射が起こり、それが回路 A の出力端子まで伝わって来る。もし、回路 A の出力側から見たインピーダンス（必ずしも出力インピーダンスと呼ばれるものとは一致しない）が特性インピーダンスになっていなかったら、ここでも反射が起こり、回路 B の入力端子にはこれが伝わって来る。

上に述べたように、同軸ケーブルを伝わって来るパルス信号を受ける端子では、マッチングをとる（整合する）ことが望ましいが、もし、マッチングしなかった場合にはどのような反射が起こるだろうか。この反射は応々にして、積極的に利用されることもある。

いま図 13A にあるように、電池（内部抵抗はゼロとする）が同軸ケーブルの特性インピーダンスと等しい抵抗値 $Z_0$ とスイッチと組合わさって信号源となっているとする。使用されている同軸ケーブルは理想的なもので特性インピーダンス $Z_0$ で長さは $l$ 、そして信号の伝播速度は $v$ とする。ケーブルの終端には $Z_L$ というインピーダンス（一般には複素数）の素子が結線されている。もし $t = 0$ にスイッチが閉じられたならば、電波の電圧を 1V とすると 0.5V の電圧が同軸ケーブルの内部を伝わっていく。電圧が半分になるのは信号源のインピーダンス $Z_0$ とケーブルの特性インピーダンス $Z_0$ に分割されるからである。この信号は電流と電圧の間に $V/I = Z_0$ という関係をたもちながら $l/v$ だけの時間がかかって終端に伝わる。そして負荷にはそれぞれのインピーダンスに応じた電圧・電流パルスを出す。この様子は図 13B に示している。

どうしてこのようになるのかを考えてみる。今 $I_1, V_1$ が中心線を左から右へ伝わって行く電流と電圧だとし、$I_2$,　$V_2$ がその終端での反射とする。この時、負荷（ロード）に流れる電流 $I_L$ と加わる電圧 $V_L$ は

$$\begin{aligned} V_L &= V_1 + V_2 \\ I_L &= I_1 - I_2 \end{aligned}$$

となる。そして V と I との間にはそれぞれ

$$V_L = I_L Z_L$$

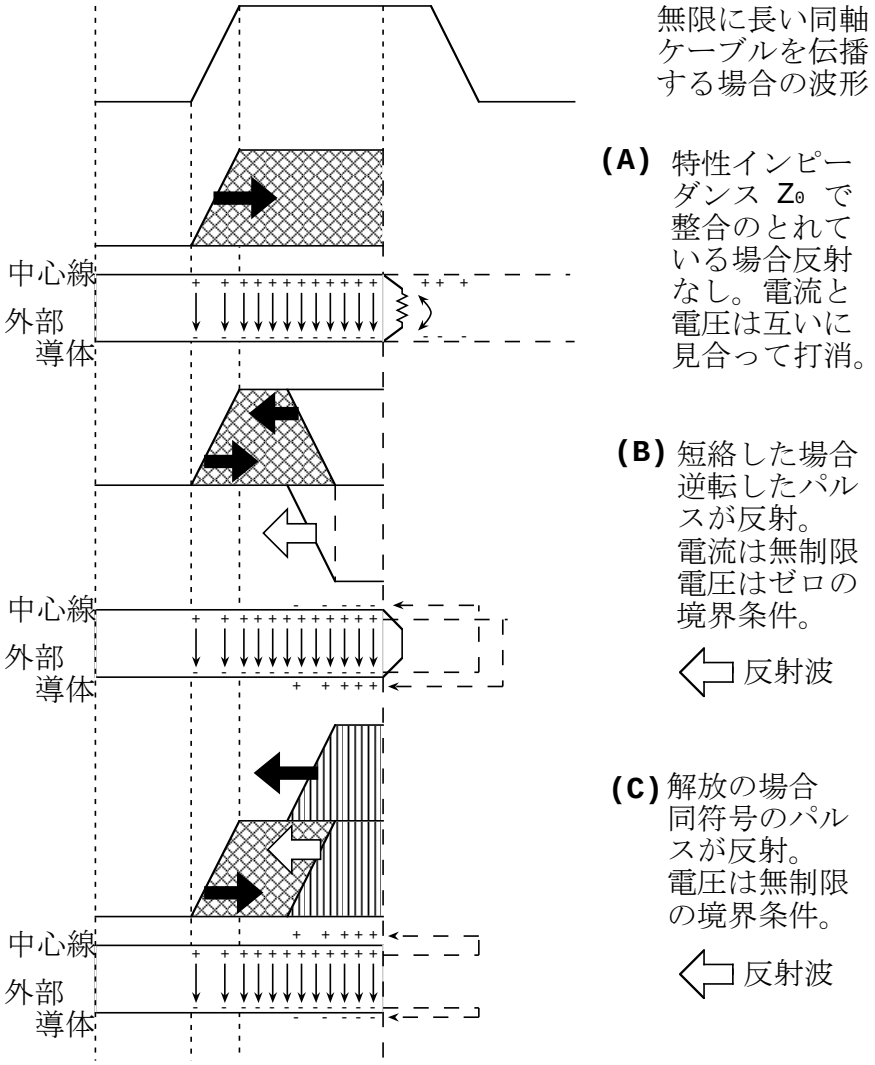


図 15: 同軸ケーブルの終端と負荷の反射

$$
\begin{aligned}
V_1 &= I_1 Z_0 \\
V_2 &= I_2 Z_0
\end{aligned}
$$

という関係があるので、

$$
\begin{aligned}
V_L &= I_L \cdot Z_L \\
&= (I_1 - I_2)\, Z_L \\
&= (V_1 - V_2)\, \frac{Z_L}{Z_0}
\end{aligned}
$$

となり、従って、

$$
\frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = r
$$

となる。ここで係数 $r$ は電圧反射率と呼ばれる。一般には $r$ は複素数であるが、$Z_L$ が実数ならば $r$ も実数になる。

(A) $Z_L = Z_0$ ならば $r = 0$ で反射なし
(B) $Z_L \gg Z_0$ ならば $r = 1$ で 100% 反射
(C) $Z_L \approx 0$ ならば $r = -1$ で 100% 反射（但し極性が反転する）

### 3.2.3 インピーダンスマッチングをとる方法

もし負荷（または回路の入力インピーダンス）が実数 $Z$ の時、$Z > Z_0$ ならば並列に適当な抵抗を入れ、$Z < Z_0$ ならば直列に適当な抵抗を入れて全体として $Z_0$ にする。これ以外にもトランスを用いればマッチングをとることが出来る。